

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Drone

Drone merupakan pesawat tanpa pilot yang mana pada sistem kendalinya dapat dikendalikan secara otomatis melalui program komputer yang dirancang, atau melalui kendali jarak jauh dari pilot yang terdapat di dataran atau di kendaraan lainnya. Awalnya UAV merupakan pesawat yang dikendalikan jarak jauh, namun sistem otomatis kini mulai banyak diterapkan.

Perkembangan teknologi membuat drone juga mulai banyak diterapkan untuk kebutuhan sipil, terutama di bidang bisnis, industri dan logistik. Amazon memulai persaingan industri ini melalui peluncuran layanan *Amazon Prime Air*. Pengangkutan barang menjadi lebih cepat, lebih praktis, minim *human error*, dan mampu menjangkau lokasi terpencil.

Hingga saat ini di dunia industri bisnis, drone telah diterapkan dalam berbagai layanan seperti:

- Pengawasan Infrastruktur Fisik (pabrik, pelabuhan, jaringan listrik, dsb.)
- Pengiriman Paket Barang
- Pemadam Kebakaran Hutan
- Eksplorasi Lokasi Tambang, Minyak/Mineral



Gambar 2.1 drone quadcopter

(sumber : <http://zoniaelektro.net/komponen-dan-prinsip-kerja-quadcopter/>)

2.1.1. Sejarah *drone*

Penggunaan dan pengembangan teknologi drone muncul sejak awal abad 19, sebelum perang dunia I, pertama kali di tanggal 22 Agustus 1849. Pada saat itu, ada pertempuran antara Austria melawan kota Venesia, Italia. Austria yang menguasai mayoritas wilayah Italia meluncurkan ratusan balon dari kapal Austria Vulcano. Dan balon - balon tersebut pun berhasil mengenai target, walaupun beberapa diantaranya justru meleset berubah arah karena tertiuip angin dan malah meledak di perbatasan Austria dan Italia. Kemudian, pada 8 November 1898, Nicolas Tesla, penemu AS keturunan Serbia mematenkan remote control atau pengendali jarak jauh temuannya. Remote control ini menjadi dasar ilmu robotik kontemporer. Tesla membuat kapal dan balon yang bisa dikendalikan dari jarak jauh.

Berasal dari pertempuran tersebut, pada tahun 1916, sebuah konsep pesawat tanpa awak dibuat dan diberi nama "*Aerial Target*". Namun sepanjang pembuatannya, ternyata alat tersebut tak kunjung diterbangkan. Namun beberapa waktu kemudian, debut pesawat tanpa awak bernama "*Hewitt-Sperry Automatic Airplane*" pun selesai diproduksi. Dan pesawat tanpa awak jenis ini yang pertama kali terbang dengan membawa misi bom terbang. Teknologi tersebut pun sudah mengusung konsep *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) dan dapat dikontrol dari jarak jauh. Penggunaanya pun untuk meluncurkan torpedo udara atau rudar jelajah. Dan pada saat itu, pesawat tanpa awak tersebut pun dikendalikan menggunakan giroskop.

Sepanjang kiprah Hewitt-Sperry Automatic Airplane, militer Angkatan Darat Amerika Serikat pun mencoba mengambil alih pengembangannya. Pada tahun 1917, pesawat tersebut akhirnya dikembangkan sebagai mesin torpedo udara milik militer negeri paman sam itu. Dan pada tahun 1918, debut lanjutan pesawat tanpa awak tersebut melahirkan generasi selanjutnya yang diberinama "*Bug Kettering*". Setelah itu, pesawat tanpa awak tersebut digunakan untuk peperangan pada era Perang Dunia I. Perkembangannya pun lambat laun bukan hanya dilakukan oleh Amerika saja. Pada tahun 1931, pesawat tanpa awak bernama "*Fairey Queen*" juga dikembangkan oleh Inggris. Dan paada tahun 1935

bersamaan dengan lahirnya generasi pesawat tanpa awak bernama “DH.82B Queen Bee” hasil pengembangan Inggris pun menjadi awal mula munculnya sebutan “Drone”. Kemudian pada era Perang Dunia II, Drone digunakan untuk alat latihan para tentara untuk menembak target. Militer Jerman dari pemerintahan Nazi juga menggunakan drone sebagai senjata udara UAV sepanjang Perang Dunia II tersebut.

Kelahiran UAV Amerika dimulai pada 1959, ketika Angkatan Udara AS, khawatir kehilangan pilot di atas wilayah musuh, mulai merencanakan penerbangan tanpa awak. Setelah Soviet berhasil menembak pesawat mata-mata mereka U-2 pada tahun 1960, program UAV yang sangat rahasia diluncurkan dengan kode “Red Wagon”. UAV era-modern digunakan pertama selama 2 Agustus dan 4 Agustus. Pada 1964 ketika terjadi bentrokan di Teluk Tonkin antara AS dan angkatan laut Vietnam Utara. Selama Perang Vietnam, China menunjukkan foto-foto pesawat tanpa awak AS yang jatuh setelah Perang Vietnam respon Angkatan Udara AS hanyalah “no comment”. Namun pada 1973, militer AS akhirnya secara resmi mengkonfirmasi bahwa mereka telah memanfaatkan teknologi UAV di Vietnam, dengan menyatakan bahwa selama perang, lebih dari 3.435 misi UAV diterbangkan, dimana sekitar 554 hilang dalam pertempuran.

Ketika Perang Yom Kipur 1973, Israel mengembangkan UAV pertama dengan real-time surveilans. Setelah itu rudal permukaan udara Soviet yang digunakan Mesir dan Suriah bisa digempur jet Israel hingga rusak parah. Gambar dan radar decoying disediakan oleh UAV ini membantu Israel untuk menetralkan pertahanan udara Suriah pada awal 1982, ketika Perang Libanon, sehingga tidak ada pilot yang tewas. Pada tahun 1987, Israel telah mengembangkan UAV berbasis siluman, dorong tiga dimensi vectoring kontrol, UAV jet untuk pertama kalinya. Perkembangan teknologi UAV tumbuh pesat selama tahun 1980 dan 1990 yang digunakan selama Perang Teluk Persia pada 1991 dan menjadi mesin pertempuran lebih murah dan lebih mampu. Sementara sebagian besar drone dari tahun-tahun sebelumnya yang terutama pesawat pengintai, beberapa telah berevolusi dengan mampu membawa amunisi. General Atomics MQ-1, yang

menggunakan AGM-114 Hellfire, rudal udara ke permukaan dikenal sebagai kendaraan udara tempur tak berawak (UCAV). Sementara kebanyakan UAV yang digunakan oleh militer, teknologi ini ditugaskan oleh CIA setelah serangan teroris 11 September 2001. Operasi pengumpulan intelijen dimulai pada tahun 2004, dengan UAV, CIA yang dioperasikan terutama terbang di atas Afghanistan, Pakistan, Yaman, dan Somalia. Program UAV pertama CIA disebut Eagle Program. Pada 2008, USAF telah mempekerjakan 5.331 UAV, yang berarti dua kali jumlah pesawat berawak. Dari jumlah tersebut, Predator telah menjadi yang paling dipuji. Tidak seperti UAV lain, Predator dipersenjatai dengan rudal Hellfire. Predator digunakan selama perburuan Osama Bin Laden dan telah menunjukkan kemampuan menunjuk laser pada target untuk akurasi. Keberhasilan keseluruhan dari misi Predator jelas karena dari Juni 2005 sampai Juni 2006 saja, Predator melakukan 2,073 misi sukses dalam 242 serangan terpisah. Sementara Predator dioperasikan dari jarak jauh melalui satelit dari lebih dari 7.500 mil jauhnya, Global Hawk beroperasi hampir mandiri. Setelah pengguna menekan tombol, menyiagakan UAV lepas landas, satu-satunya interaksi antara darat dan UAV adalah petunjuk arah melalui GPS. Global Hawks memiliki kemampuan untuk lepas landas dari San Francisco, terbang melintasi Amerika Serikat, dan memetakan seluruh negara bagian Maine sebelum kemudian kembali. Pada Februari 2013, dilaporkan bahwa UAV yang digunakan oleh setidaknya 50 negara, beberapa di antaranya telah membuat sendiri, termasuk Iran, Israel, China dan Indonesia.



Gambar 2.2 Pesawat tanpa awak

(sumber : <http://wikipedia.org/wiki/Drone>, diakses terakhir tanggal 16 April 2015)

2.1.2. Perkembangan drone

Era perang dunia Pesawat tanpa pilot pertama dikembangkan selama dan setelah Perang Dunia I. Yang pertama adalah “*Aerial Target*,” dikembangkan pada 1916 ini dimaksudkan untuk meniru Zeppelins, tetapi tidak pernah terbang. Tak lama kemudian, Hewitt-Sperry Automatic Airplane (bom terbang) melakukan penerbangan perdananya, menunjukkan konsep pesawat tak berawak. UAV ini rencananya digunakan sebagai torpedo udara, versi awal dari rudal jelajah modern. Pengendalian pesawat ini dengan menggunakan giroskop. Pada bulan November 1917, Hewitt-Sperry Automatic Airplane ditunjukkan untuk Angkatan Darat AS. Setelah keberhasilan demonstrasi ini, Angkatan Darat menugaskan sebuah proyek untuk membangun sebuah torpedo udara, yang kemudian dikenal sebagai Bug Kettering dan terbang tahun 1918. Beberapa penerus dikembangkan selama periode setelah Perang Dunia I dan sebelum Perang Dunia II. Ini termasuk Laring, diuji oleh Royal Navy antara tahun 1927 dan 1929, Fairey “Queen” yang dikembangkan oleh Inggris pada tahun 1931 masih oleh Inggris dengan UAV “DH.82B Queen Bee” pada tahun 1935. Dari UAV inilah pertama kali digunakan istilah “*drone*” Pesawat tanpa pilot pertama dikembangkan selama dan setelah Perang Dunia I.

Yang pertama adalah “*Aerial Target*,” dikembangkan pada 1916 ini dimaksudkan untuk meniru Zeppelins, tetapi tidak pernah terbang. Tak lama kemudian, Hewitt-Sperry Automatic Airplane (bom terbang) melakukan penerbangan perdananya, menunjukkan konsep pesawat tak berawak. UAV ini rencananya digunakan sebagai torpedo udara, versi awal dari rudal jelajah modern. Pengendalian pesawat ini dengan menggunakan giroskop. Pada bulan November 1917, Hewitt-Sperry Automatic Airplane ditunjukkan untuk Angkatan Darat AS. Setelah keberhasilan demonstrasi ini, Angkatan Darat menugaskan sebuah proyek untuk membangun sebuah torpedo udara, yang kemudian dikenal sebagai Bug Kettering dan terbang tahun 1918 . Beberapa penerus dikembangkan selama periode setelah Perang Dunia I dan sebelum Perang Dunia II. Ini termasuk Laring, diuji oleh Royal Navy antara tahun 1927 dan 1929, Fairey “Queen” yang dikembangkan oleh Inggris

pada tahun 1931 masih oleh Inggris dengan UAV “DH.82B Queen Bee” pada tahun 1935. Dari UAV inilah pertama kali digunakan istilah ”*drone*” Selama Perang Dunia II, *drone* digunakan baik sebagai alat latihan untuk target menembak untuk sistem pertahanan udara maupun pesawat terbang. Nazi Jerman juga telah diproduksi dan menggunakan UAV selama Perang Dunia II. Setelah perang, mesin jet yang diterapkan untuk drone, dengan yang pertama adalah Teledyne Ryan Firebee I 1951 Pada tahun 1955, Model 1001, dikembangkan oleh Beechcraft yang dibuat untuk Angkatan Laut Amerika Serikat. UAV ini tidak lebih dari pesawat yang dikendalikan remote sampai Era Vietnam.² Era modern Pesawat drone pertama UAV milik USA Kelahiran UAV Amerika dimulai pada 1959 ketika Angkatan Udara AS, khawatir kehilangan pilot di atas wilayah musuh, mulai merencanakan penerbangan tanpa awak. Setelah Soviet berhasil menembak pesawat mata-mata mereka U-2 pada tahun 1960, program UAV yang sangat rahasia diluncurkan dengan kode “*Red Wagon*.” UAV era-modern digunakan pertama selama 2 Agustus dan 4 Agustus. Pada 1964 ketika terjadi bentrokan di Teluk Tonkin antara AS dan angkatan laut Vietnam Utara. Selama Perang Vietnam. Ketika China menunjukkan foto-foto pesawat tanpa awak AS yang jatuh setelah Perang Vietnam respon Angkatan Udara AS hanyalah “*no comment*.” Namun, pada 1973, militer AS akhirnya secara resmi mengkonfirmasi bahwa mereka telah memanfaatkan teknologi UAV di Vietnam, yang menyatakan bahwa selama perang, lebih dari 3.435 misi UAV diterbangkan, dimana sekitar 554 hilang dalam pertempuran. Ketika Perang Yom Kipur 1973, Israel mengembangkan UAV pertama dengan real-time surveilans. Setelah itu rudal permukaan udara Soviet yang digunakan Mesir dan Suriah bisa digempur jet Israel hingga rusak parah. Gambar dan radar decoying disediakan oleh UAV ini membantu Israel untuk menetralsir pertahanan udara Suriah pada awal 1982 ketika Perang Libanon, sehingga tidak ada pilot yang tewas. Pada tahun 1987, Israel telah mengembangkan UAV berbasis siluman, dorong tiga dimensi vectoring kontrol, UAV jet untuk pertama kalinya. Perkembangan teknologi UAV tumbuh pesat selama tahun 1980 dan 1990 – yang digunakan selama Perang Teluk

Persia pada 1991 – dan menjadi mesin pertempuran lebih murah dan lebih mampu.

Sementara sebagian besar *drone* dari tahun-tahun sebelumnya yang terutama pesawat pengintai, beberapa telah berevolusi dengan mampu membawa amunisi. General Atomics MQ-1, yang menggunakan AGM-114 Hellfire rudal udara-ke-permukaan dikenal sebagai kendaraan udara tempur tak berawak (UCAV). Setelah terror 9/11 Sementara kebanyakan UAV yang digunakan oleh militer, teknologi ditugaskan oleh CIA setelah serangan teroris 11 September 2001. Operasi pengumpulan intelijen dimulai pada tahun 2004, dengan UAV CIA yang dioperasikan terutama terbang di atas Afghanistan, Pakistan, Yaman, dan Somalia. Program UAV pertama CIA disebut Eagle Program. Pada 2008, USAF telah mempekerjakan 5.331 UAV, yang berarti dua kali jumlah pesawat berawak. Dari jumlah tersebut, Predator telah menjadi yang paling dipuji. Tidak seperti UAV lain, Predator dipersenjatai dengan rudal Hellfire. Predator digunakan selama perburuan Osama Bin Laden dan telah menunjukkan kemampuan menunjuk laser pada target untuk akurasi. Keberhasilan keseluruhan dari misi Predator jelas karena dari Juni 2005 sampai Juni 2006 saja, Predator melakukan 2,073 misi sukses dalam 242 serangan terpisah. Sementara Predator dioperasikan dari jarak jauh melalui satelit dari lebih dari 7.500 mil jauhnya, Global Hawk beroperasi hampir mandiri. Setelah pengguna menekan tombol, menyiagakan UAV lepas landas, satu-satunya interaksi antara darat dan UAV adalah petunjuk arah melalui GPS. Global Hawks memiliki kemampuan untuk lepas landas dari San Francisco, terbang melintasi Amerika Serikat, dan memetakan seluruh negara bagian Maine sebelum kemudian kembali.

Pada Februari 2013, dilaporkan bahwa UAV yang digunakan oleh setidaknya 50 negara, beberapa di antaranya telah membuat sendiri, termasuk Iran, Israel dan China. Kegunaan pesawat drone UAV (Unmanned Aerial Vehicle) atau yang biasa kita tahu sebagai pesawat tanpa awak adalah pesawat-pesawat kecil yang dapat terbang tanpa dikendarai oleh manusia. Lalu bagaimana pesawat tersebut bisa dikendalikan? Pesawat tanpa awak atau UAV biasa dikendalikan dengan remote control, dikendalikan melalui satelit, ataupun dapat dikendalikan

secara otomatis. Diera modern ini UAV atau pesawat tanpa awak mulai mendapat banyak perhatian karena memiliki banyak fungsi dan kegunaan yang sangat beragam baik untuk militer, sipil, maupun untuk ilmu pengetahuan. Kegunaan yang sangat beragam itu tak terlepas dari kemampuannya yang dikendalikan tanpa awak (manusia) sehingga dapat menghindarkan korban jiwa manusia apabila digunakan pada tempat-tempat atau area yang sangat beresiko. Selain itu, bentuknya yang kecil dan mudah dibuat juga membuatnya lebih ekonomis atau biayanya lebih murah. Sehingga bisa digunakan bahkan di sekolah-sekolah biasa untuk bahan eksperimen ataupun bahkan untuk para pecinta dunia aeromodelling.



Gambar 2.3 Drone buatan pabrik

(sumber : Dr. Agus Purwadi, *Penelitian dan Pengembangan drone Nasional* 2014)

2.2. Motor *Brushless DC*

2.2.1` Motor Listrik BLDC (800 Watt 48VDC)

Motor arus searah adalah sebuah motor yang membutuhkan tegangan dc untuk menjalankannya. Pada umumnya motor jenis ini menggunakan sikat dan mengoperasikannya sangat mudah tinggal dihubungkan dengan *Battery* sehingga motor langsung berputar. Jenis motor ini memerlukan perawatan pada sikatnya serta banyak terjadi rugi tegangan pada sikat. Sehingga pada era sekarang ini motor DC dikembangkan tanpa menggunakan sikat yang dikenal dengan Motor BLDC (*Brush Less DirectCurrent Motor*). Motor ini dipilih karena efisiensi yang tinggi, suaranya halus, ukuran kompak, keandalan yang tinggi dan perawatan yang rendah. Motor ini lebih disukai untuk berbagai aplikasi, namun kebanyakan dari mereka memerlukan kontrol tanpa sensor. Pengoperasian motor BLDC membutuhkan sensor posisi rotor untuk mengendalikan arusnya.

2.2.2 Pengertian BLDC Motor

BLDC Motor (*Brush Less DirectCurrent Motor*) adalah suatu jenis motor sinkron, artinya medan magnet yang dihasilkan oleh stator dan medan magnet yang dihasilkan oleh rotor berputar di frekuensi yang sama. BLDC motor tidak mengalami slip, tidak seperti yang terjadi pada motor induksi biasa. Motor jenis ini mempunyai permanen magnet pada bagian rotor sedangkan elektro-magnet pada bagian statornya. Setelah itu, dengan menggunakan sebuah rangkaian sederhana (*Simpel Computer System*), maka kita dapat merubah arus di elektro-magnet ketika bagian rotornya berputar.

Dalam hal ini, motor BLDC setara dengan motor DC dengan komutator terbalik, di mana magnet berputar sedangkan konduktor tetap diam. Dalam komutator motor DC, polaritas ini diubah oleh komutator dan sikat. Namun, dalam *Brushless* motor DC, pembalikan polaritas dilakukan oleh transistor *Switching* untuk mensinkronkan dengan posisi rotor. Oleh karena itu, BLDC motor sering menggabungkan baik posisi sensor internal atau eksternal untuk merasakan posisi rotor yang sebenarnya, atau posisi dapat dideteksi tanpa sensor. (*Leonard N. Elevich, 2005*)



Gambar 2.4 Konstruksi Motor BLDC

(Sumber: <http://motor-listrik-blcd.jpg>, diakses tanggal 20 April 2015)

2.2.3 Konstruksi BLDC Motor

Setiap motor BLDC memiliki dua bagian utama, rotor (bagian berputar) dan stator (bagian stasioner). Bagian penting lainnya dari motor adalah gulungan stator dan magnet rotor.

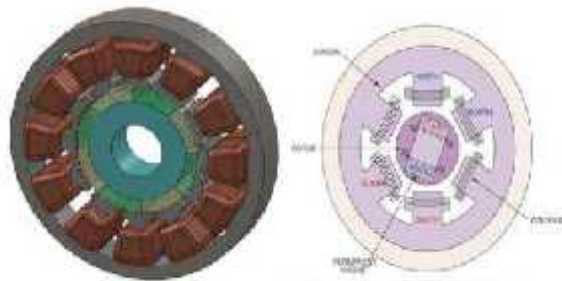
1. Rotor

Rotor adalah bagian pada motor yang berputar karena adanya gaya elektromagnetik dari stator, dimana pada motor DC *Brushless* bagian rotornya berbeda dengan rotor pada motor DC konvensional yang hanya tersusun dari satu buah elektromagnet yang berada diantara *Brushes* (sikat) yang terhubung pada dua buah motor hingga delapan pasang kutub magnet permanen berbentuk persegi panjang yang saling direkatkan menggunakan semacam "*Epoxy*" dan tidak ada *Brushes*-nya.

Rotor dibuat dari magnet tetap dan dapat desain dari dua sampai delapan kutub magnet utara (N) atau selatan (S). Material magnetis yang bagus sangat diperlukan untuk mendapatkan kerapatan medan magnet yang bagus pula. Biasanya magnet ferrit yang dipakai untuk membuat magnet tetap, tetapi material ini mempunyai kekurangan yaitu *Flux Density* yang rendah untuk ukuran volume material yang diperlukan untuk membentuk rotor.

2. Stator

Stator adalah bagian pada motor yang diam/statik dimana fungsinya adalah sebagai medan putar motor untuk memberikan gaya elektromagnetik pada rotor sehingga motor dapat berputar. Pada motor DC *Brushless* statornya terdiri dari 12 belitan (elektromagnet) yang bekerja secara elektromagnetik dimana stator pada motor DC *Brushless* terhubung dengan tiga buah kabel untuk disambungkan pada rangkaian kontrol sedangkan pada motor DC konvensional statornya terdiri dari dua buah kutub magnet permanen.



Gambar 2.5 Penampang Motor BLDC

(Sumber: Azzumar Muhammad, *Jurnal Permodelan dan simulasi BLDC motor UI*, 2012)

Belitan stator pada motor DC *brushless* terdiri dari dua jenis, yaitu belitan stator jenis *Trapezoidal* dan jenis *Sinusoidal*. Dasar perbedaan kedua jenis belitan stator tersebut terletak pada hubungan antara koil dan belitan stator yang bertujuan untuk memberikan EMF (*Electro Motive Force*) balik yang berbeda.

EMF balik adalah tegangan balik yang dihasilkan oleh belitan motor BLDC ketika motor BLDC tersebut berputar yang memiliki polaritas tegangan berlawanan arahnya dengan tegangan sumber yang dibangkitkan. Besarnya EMF balik dipengaruhi oleh kecepatan sudut putaran motor (ω), medan magnet yang dihasilkan rotor (B), dan banyaknya lilitan pada belitan stator (N) sehingga besarnya EMF balik dapat dihitung dengan persamaan:

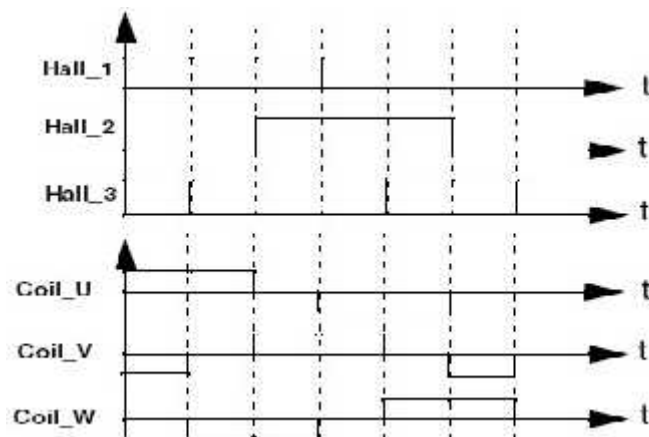
Ketika motor BLDC sudah dibuat, jumlah lilitan pada stator dan besarnya medan magnet yang dihasilkan nilainya sudah dibuat konstan sehingga yang mempengaruhi besarnya EMF balik adalah besarnya kecepatan sudut yang dihasilkan motor, semakin besar kecepatan sudut yang dihasilkan. Perubahan besarnya EMF balik ini mempengaruhi torsi motor BLDC, apabila kecepatan motor yang dihasilkan lebih besar dari tegangan potensial pada belitan stator sehingga arus yang mengalir pada stator akan turun dan torsi pun akan ikut turun, sebagaimana rumus torsi pada BLDC motor menurut persamaan diatas bahwa besarnya torsi yang dihasilkan motor BLDC.

Karena berbanding lurus dengan faktor-faktor lain yang mempengaruhi torsi, maka kenaikan dan penurunan arus sangat berpengaruh pada besarnya torsi yang dihasilkan motor BLDC.

3. SensorHall

Komutasi dari motor DC *Brushless* diatur secara elektronik agar motor dapat berputar, stator harus *Energize* secara berurutan dan teratur. Sensor hall inilah yang berperan dalam mendeteksi pada bagian rotor mana yang *Energize* oleh fluks magnet sehingga proses komutasi yang berbeda (enam step komutasi) dapat dilakukan oleh stator dengan tepat karena sensor hall ini dipasang menempel pada stator.

Untuk estimasi posisi rotor, motor ini dilengkapi dengan tiga sensor hall yang ditempatkan setiap 120° . Dengan sensorini, ada 6 komutasi yang mungkin berbeda. Pergantian *Fase Power Supply* tergantung pada nilai-nilai sensor hall dengan perubahan kumparan.



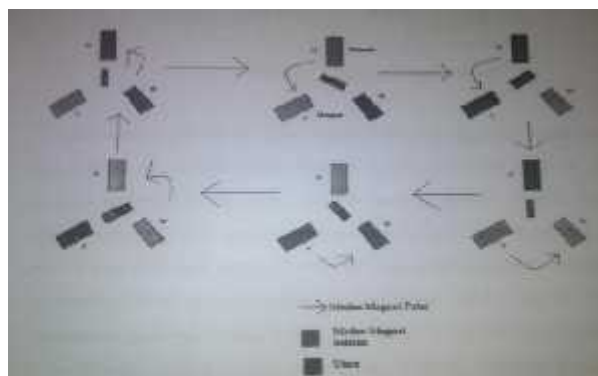
Gambar 2.6 Sensor Hall Sinyal Untuk Rotasi Kanan

(Sumber: Azzumar Muhammad, *Jurnal Permodelan dan simulasi BLDC motor UI*, 2012)

2.2.4 Prinsip Kerja BLDC Motor

Motor BLDC ini dapat bekerja ketika stator yang terbuat dari kumparan diberikan arus 3 fasa. Akibat arus yang melewati kumparan pada stator timbul medan magnet.

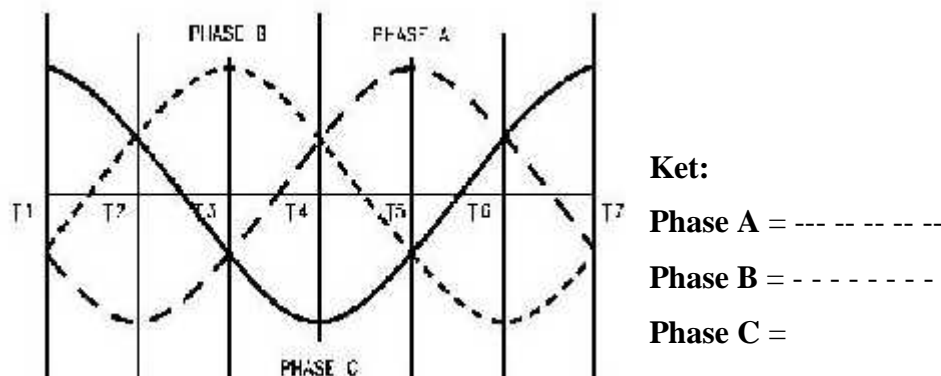
Karena arus yang diberikan berupa arus AC 3 fasa sinusoidal, nilai medan magnet dan polarisasi setiap kumparan akan berubah-ubah setiap saat. Akibat yang ditimbulkan dari adanya perubahan polarisasi dan besar medan magnet tiap kumparan adalah terciptanya medan putar magnet dengan kecepatan:



Gambar 2.7. Medan Magnet Putar Stator dan Perputaran Rotor

(Sumber: Azzumar Muhammad, *Jurnal Permodelan dan simulasi BLDC motor UI*, 2012)

Berdasarkan gambar 2.7, medan putar magnet stator timbul akibat adanya perubahan polaritas pada stator U, V, dan W. Perubahan polaritas ini terjadi akibat adanya arus yang mengalir pada stator berupa arus AC yang memiliki polaritas yang berubah-ubah.



Gambar 2.8 Tegangan Stator BLDC

(Sumber: Azzumar Muhammad, *Jurnal Permodelan dan simulasi BLDC motor UI*, 2012)

Berdasarkan gambar 2.19, ketika stator U diberikan tegangan Negatif maka akan timbul medan magnet dengan polaritas negatif sedangkan V dan W yang diberikan tegangan positif akan memiliki polaritas positif. Akibat adanya perbedaan polaritas antara medan magnet kumparan stator dan magnet rotor, sisi positif magnet rotor akan berputar mendekati medan magnet stator U, sedangkan sisi negatifnya akan berputar mengikuti medan magnet stator V dan W. Akibat tegangan yang digunakan berupa tegangan AC *Sinusoidal*, medan magnet stator U, V, dan W akan berubah-ubah polaritas dan besarnya mengikuti perubahan tegangan sinusoidal AC. Ketika U dan V memiliki medan magnet negatif akibat mendapatkan tegangan negatif dan W memiliki medan magnet positif akibat tegangan positif, magnet permanen rotor akan berputar menuju ke polaritas yang bersesuaian yakni bagian negatif akan berputar menuju medan magnet stator W dan sebaliknya bagian positif akan berputar menuju medan magnet stator U dan V. Selanjutnya ketika V memiliki medan magnet negatif dan U serta W

memiliki medan magnet positif, bagian positif bagian positif magnet permanen akan berputar menuju V dan bagian negatif akan menuju U dari kumparan W. Karena tegangan AC sinusoidal yang digunakan berlangsung secara kontinu, proses perubahan polaritas tegangan pada stator ini akan terjadi secara terus menerus sehingga menciptakan medan putar magnet stator dan magnet permanen rotor akan berputar mengikuti medan putar magnet stator ini. Hal inilah yang menyebabkan rotor pada BLDC dapat berputar. (sumber : <http://documents.tips/documents/uav55cf85d0550346484b91a475.html>)

2.2.5 Keunggulan BLDC Motor

Brushless DC (BLDC) motor adalah pilihan ideal untuk aplikasi yang memerlukan keandalan yang tinggi, efisiensi tinggi, dan tinggi *Power-To-Volumerasio*. Secara umum, motor BLDC dianggap motor performa tinggi yang mampu memberikan jumlah besar torsi pada rentang kecepatan yang luas. Berikut adalah beberapa kelebihan BLDC motor dibandingkan motor jenis lainnya:

- *High Speed Operation*, sebuah motor BLDC dapat beroperasi pada kecepatan di atas 10.000 rpm dalam kondisi dimuat dan dibongkar.
- Responsif dan percepatan cepat, rotor BLDC motor memiliki inersia rotor rendah, yang memungkinkan mereka untuk mempercepat, mengurangi kecepatan, dan membalik arah dengan cepat.
- *High Power Density*, BLDC motor memiliki torsi berjalan tertinggi per inci kubik setiap motor DC.
- Keandalan tinggi, BLDC motor tidak memiliki sikat, yang berarti mereka lebih handal dan memiliki harapan hidup lebih dari 10.000 jam. Hal ini menghasilkan lebih sedikit kasus penggantian atau perbaikan secara keseluruhan.

Perbedaan utama antara motor DC magnet permanen (DC-MP) dengan motor *brushless* DC terletak pada pembangkitan medan magnet untuk menghasilkan gaya gerak. Jika pada motor DC-MP medan magnet yang dikontrol berada di rotor dan medan magnet tetap berada di stator. Sebaliknya, motor *brushless* menggunakan pembangkitan medan magnet stator untuk mengontrol

geraknya sedang medan magnet tetap berada di rotor. Motor BLDC mempunyai banyak keuntungan dibandingkan dengan motor DC lainnya, yaitu:

1. Kecepatan yang lebih baik untuk melawan karakteristik tenaga putaran.
2. Tanggapan dinamis tinggi.
3. Efisiensi tinggi.
4. Tahan lama atau usia pakai lebih lama.
5. Nyaris tanpa suara bila dioperasikan.
6. *Speed range* yang lebih luas.

Perbandingan tenaga putaran lebih besar dibanding dengan ukuran motor, dengan ukuran motor yang relatif kecil dapat menghasilkan torsi yang cukup besar. Jadi ini sangat bermanfaat bila akan digunakan pada aplikasi yang sangat kritis terhadap beban dan tempat pemasangan. Menggunakan motor yang bertegangan (rpm/volt) rendah (dibawah 1000KV), ini akan mempengaruhi agresi *quadcopter* dan efisiensi. Perkirakan juga beban yang akan di angkat motor, ini akan menentukan pemilihan daya motor. Setiap motor punya daya dorong (*trust*), misalkan ;

motor dengan *trust* 500gr x 4 = 2000gr

maka berat maksimal *quadcopter* $\frac{3}{4}$ x 2000gr = 1500gr.

(sumber : <http://www.insinyoer.com/prinsip-kerja-motor-brushless-dc-blDC-motor/2/>)

Tabel 2.1 Karakteristik Motor DC *Brushless*

Parameter	Nilai
KV (rpm/v)	920
<i>Weight</i> (g)	57
<i>Max Current</i> (A)	16
<i>Resistance</i> (mh)	90

<i>Max Voltage (V)</i>	11
<i>Power(W)</i>	150

(Sumber: Permodelan dan Simulasi BLDC Motor Kecil untuk Aplikasi Aktuator Sirip Roket. Depok: Universitas Indonesia.)

2.2.6 Menghitung RPM (Rotation Per Minute) Pada Tiap Motor

RPM (*Rotation Per Minute*) adalah banyaknya motor berputar dalam satu menit. Semakin tinggi nilai Kv pada motor maka semakin cepat motor tersebut berputar. Quadcopter ini menggunakan nilai kv sebesar 750 kv. Berikut adalah rumus menghitung RPM pada motor.

$$\text{RPM} = \text{Kv}_{\text{Motor}} \times \text{Tegangan}_{\text{Motor}}$$

Kv adalah konstanta yang menunjukkan jumlah putaran per satuan tegangan (RPM / Volt) dalam 1 menit. Misalkan tertera 750 kv berarti dalam 1 volt dapat menghasilkan 750 kali putaran dalam 1 menit.

2.3 Electronic Speed Control (ESC)

Electronic speed control (ESC) adalah rangkaian elektronik yang berfungsi sebagai pengatur kecepatan putaran motor pada pesawat RC atau helikopter RC, cara kerjanya yaitu dengan cara menterjemahkan sinyal yang diterima *receiver* dari *transmitter*. Di pasaran terdapat berbagai merk ESC dengan kekuatan arus (*current rating*) dan kekuatan voltase (*voltage rating*) serta *feature* yang ditawarkan.



Gambar 2.9 *Electronic speed control (ESC)*

Sumber : (www.quadcopters.co.uk)

Untuk menentukan ESC yang akan kita gunakan sangatlah penting untuk mengetahui kekuatan (*peak current*) dari motor. Pilihlah ESC yang kekuatannya melebihi kekuatan motor. Misalnya, dari data kita dapatkan kekuatan motor adalah 12A (sesuai dengan datasheet motor) pada saat *throttle* terbuka penuh. ESC yang akan digunakan adalah ESC yang berkekuatan 18A atau 20A. Jika kita paksakan menggunakan ESC 10A kemungkinan pada saat *throttle* dibuka penuh, ESC akan panas bahkan terbakar. Sebuah ESC dapat menjadi unit yang berdiri sendiri yang dihubungkan ke saluran kontrol throttle penerima atau dimasukkan ke penerima itu sendiri, seperti yang terjadi di sebagian besar mainan-kelas R / C kendaraan.

Terlepas dari jenis yang digunakan, sebuah ESC menafsirkan informasi kontrol tidak gerak mekanik akan menjadi kasus servo, melainkan dengan cara yang berbeda-beda tingkat switching jaringan transistor efek medan, atau FET. The cepat switching transistor inilah yang menyebabkan motor itu sendiri untuk memancarkan merengsek bernada tinggi khas, terutama terlihat pada kecepatan rendah. Hal ini juga memungkinkan lebih halus dan lebih tepat variasi kecepatan motor dengan cara yang jauh lebih efisien daripada jenis mekanik dengan coil resistif dan bergerak lengan sekali umum digunakan.

Kebanyakan ESC modern yang menggabungkan rangkaian baterai eliminator (atau BEC) untuk mengatur tegangan untuk penerima, menghilangkan kebutuhan untuk baterai penerima terpisah. KBG biasanya baik linear atau beralih

modus regs tegangan dalam arti yang lebih luas yang PWM controller untuk motor listrik. ESC umumnya menerima nominal 50 Hz sinyal input PWM servo yang lebar pulsa bervariasi dari 1 ms untuk 2 ms. Ketika dilengkapi dengan 1 ms lebar pulsa pada 50 Hz, ESC merespon dengan mematikan motor melekat pada output. Ketika disajikan dengan 2,0 ms sinyal input, motor berjalan dengan kecepatan penuh.

Sistem ESC untuk motor disikat sangat berbeda dengan desain; sebagai hasilnya disikat ESC ini tidak kompatibel dengan motor brushless. Sistem brushless ESC pada dasarnya membuat tri-fase AC output daya dari tegangan terbatas dari onboard input daya DC, untuk menjalankan motor brushless dengan mengirimkan urutan sinyal AC yang dihasilkan dari sirkuit ESC, yang mempekerjakan impedansi sangat rendah untuk rotasi. Brushless motor, jika tidak disebut outrunners atau inrunners tergantung pada konfigurasi fisik mereka, telah menjadi sangat populer dengan "electroflight" radio - control aeromodeling penggemar karena efisiensi mereka, daya, umur panjang dan ringan dibandingkan dengan motor disikat tradisional. Namun, pengendali motor brushless AC jauh lebih rumit daripada pengendali motor disikat. Fase yang benar bervariasi dengan putaran motor, yang akan diperhitungkan oleh ESC: Biasanya, kembali EMF dari motor yang digunakan untuk mendeteksi rotasi ini, tapi variasi ada yang menggunakan magnet (Hall Effect detektor) atau optik. Membalikkan arah motor juga dapat dicapai dengan beralih dua dari tiga lead dari ESC ke motor.

Controller Kecepatan elektronik (ESC) merupakan komponen penting dari quadcopters modern (dan semua multirotors) yang menawarkan daya tinggi, frekuensi tinggi, resolusi tinggi listrik AC 3-phase ke motor dalam paket miniatur yang sangat kompak. kerajinan ini tergantung sepenuhnya pada kecepatan variabel dari motor penggerak baling-baling. Ini variasi yang luas dan kontrol RPM baik pada motor / kecepatan prop memberikan semua kontrol yang diperlukan untuk quadcopter (dan semua multirotors) untuk terbang.

Quadcopters adalah subjek hobi yang berkembang pesat, tetapi juga menyediakan tunggangan udara untuk kamera video untuk cakupan olahraga, penelitian pertanian, pemeriksaan tiang listrik dan eksplorasi bersejarah.

Quadcopter ESCs biasanya dapat menggunakan lebih cepat memperbarui tingkat dibandingkan dengan sinyal 50 Hz standar yang digunakan di sebagian besar aplikasi lainnya RC. PPM sinyal hingga 400 Hz dapat digunakan dalam beberapa kasus, dan pilihan kontrol lainnya dapat meningkatkan tingkat ini bahkan lebih tinggi. Juga beberapa penundaan perangkat lunak, seperti filter low-pass, dikeluarkan dalam rangka meningkatkan kontrol latency.

(sumber : <http://documents.tips/documents/uav55cf85d0550346484b91a475.html>)

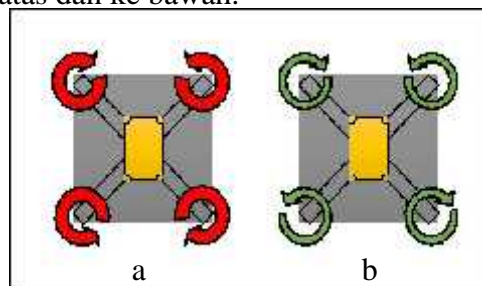
2.4 Kendali Quadcopter

Pada ujung setiap *frame* terpasang 4 buah motor *brushless* dan *propeller*, Motor ini yang akan memutar *Propeller*. Dengan mengatur kecepatan putaran dan mengatur arah putaran kedalam, sehingga menghilangkan gaya sentrifugal disekitar quadcopter mengakibatkan quadcopter bisa terangkat/terbang dan ber-*manuver*.

Ada 4 pengaturan dasar kecepatan putaran *propeller*. Pengaturan *throttle propeller*, pengaturan *pitch propeller*, pengaturan *yaw propeller*, dan pengaturan *roll propeller*.

2.4.1 Throttle Control

Pengaturan ini bertujuan untuk melakukan *vertical take-off and landing* (VTOL) bergerak ke atas dan ke bawah.

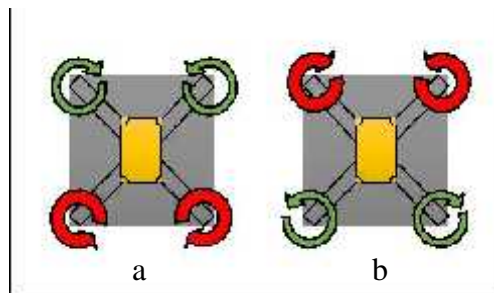


Gambar 2.10 Pengaturan *Throttle Propeller*

Putaran yang merah menandakan *propeller* berputar dengan cepat yang mengakibatkan quadcopter akan terangkat (*take-off*), sedangkan putaran yang hijau menandakan *propeller* berputar dengan lambat yang mengakibatkan quadcopter akan turun/mendarat (*landing*).

2.4.2 Pitch Control

Pengaturan *pitch propeller* adalah pengaturan yang diberikan agar quadcopter bergerak maju dan bergerak mundur. Berikut gambar yang menampilkan ilustrasi kecepatan putar *propeller* untuk pengaturan *pitch*.

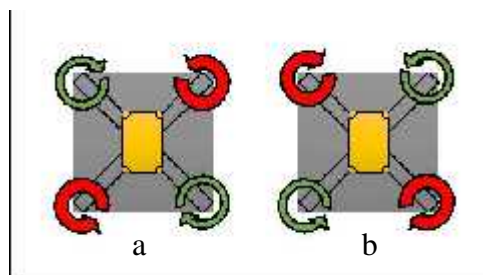


Gambar 2.11 Pengaturan *pitch propeller*

Pada gambar 2.a menampilkan ilustrasi quadcopter bergerak maju, sedangkan gambar 2.b menampilkan ilustrasi quadcopter bergerak mundur.

2.4.3 Yaw Control

Pengaturan *yaw control* bertujuan agar quadcopter bergerak berputar ke kiri dan bergerak ke kanan. Ilustrasinya dapat dilihat pada gambar 3 berikut ini.

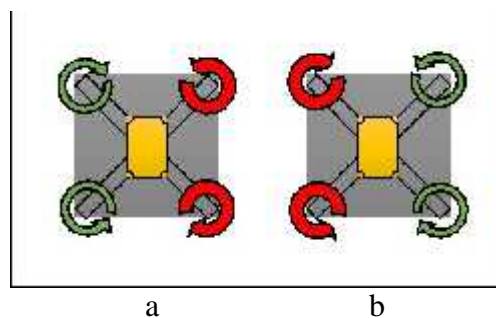


Gambar 2.12 Pengaturan *Yaw Propeller*

Pada gambar 3.a menampilkan ilustrasi pergerakan quadcopter bergerak memutar kekiri (*left rotate*) dan gambar 3.b menampilkan ilustrasi pergerakan quadcopter memutar kekanan (*right rotate*).

2.4.4 Roll Control

Pengaturan *roll propeller* diberikan agar quadcopter bergerak kekiri dan kekanan. Ilustrasi pengaturan roll propeller dapat dilihat pada gambar 4 di bawah ini.



Gambar 2.13 Pengaturan *Roll Propeller*

Pada gambar 4.a menampilkan ilustrasi gerak kekiri, sedangkan gambar 4.b menampilkan ilustrasi gerak kekanan.

2.4 Baterai Lithium Polymer (LiPo)

Baterai Lithium Polimer atau biasa disebut dengan LiPo merupakan salah satu jenis baterai yang sering digunakan dalam dunia RC. Utamanya untuk RC tipe pesawat dan helikopter. Baterai LiPo tidak menggunakan cairan sebagai elektrolit melainkan menggunakan elektrolit polimer kering yang berbentuk seperti lapisan plastik film tipis. Lapisan film ini disusun berlapis-lapis diantara anoda dan katoda yang mengakibatkan pertukaran ion. Dengan metode ini baterai LiPo dapat dibuat dalam berbagai bentuk dan ukuran. Diluar dari kelebihan arsitektur baterai LiPo, terdapat juga kekurangan yaitu lemahnya aliran pertukaran ion yang terjadi melalui elektrolit polimer kering. Hal ini menyebabkan penurunan pada charging dan discharging rate. Masalah ini sebenarnya bisa diatasi dengan memanaskan baterai sehingga menyebabkan

pertukaran ion menjadi lebih cepat, namun metode ini dianggap tidak dapat untuk diaplikasikan pada keadaan sehari-hari.

Pada pembuatan quadcopter ini menggunakan baterai LiPo (lithium polymer) dengan spesifikasi 5000mAh 3S1P 20C. 5000mAh artinya kapasitas baterai, 3S1P artinya 3 cell dipasang secara paralel dengan tiap cell memiliki 3.7 volt artinya baterai ini memiliki voltase sebesar 11.1 volt. sedangkan C adalah singkatan dari Capacity, jadi 20 C dengan 5000mAh artinya $20 \times 5000 = 100000\text{mAh} = 100\text{ A}$. 100A adalah arus yang dikeluarkan baterai dalam waktu sesaat.



Gambar 2.14 Baterai Lipo

Sumber : (indonesian.alibaba.co)

2.5 Flight Control Drone

Flight controller merupakan komponen penting *quadcopter* dan menentukan apa saja fitur dari *quadcopter* tersebut atau dapat disebut sebagai pusat saraf dari *drone*. Cara kerja *flight control* dapat dikendalikan berdasarkan GPS untuk mengaktifkan sistem *autopilot* dan diterbangkan melalui cara link telemetri untuk sistem stabilisasi dasar menggunakan hardware kelas *radio kontrol*.

Flight controller memiliki banyak sensor yang tersedia seperti GPS, sensor tekanan udara, dan sensor kecepatan udara. perangkat utama perhitungan penerbangan berbasis pada *gyroscope* dan ditambah dengan *accelerometer*. Sesuai namanya, *Accelerometer* sensor digunakan untuk mengukur percepatan *dynamic*

dan *static* suatu objek. Pengukuran *dynamic* adalah pengukuran percepatan pada objek bergerak, sedangkan pengukuran *static* adalah pengukuran terhadap gravitasi bumi. Untuk mengukur sudut kemiringan (tilt). Di situlah gyroscope sebagai tingkat ukuran . *Gyroscope* adalah perangkat untuk mengukur atau mempertahankan orientasi, dengan prinsip ketetapan momentum sudut. Mekanismenya adalah sebuah roda berputar dengan piringan didalamnya yang tetap stabil. *Gyroscope* sering digunakan pada robot atau heli dan alat-alat canggih lainnya. (sumber : <http://www.garasidrone.com/apa-saja-yang-dibutuhkan-dalam-membuat-sebuah-multicopter-atau-drone/>)



Gambar 2.15 *Flight Controller*

Sumber : (protoneer.co.nz)

2.6 Remote Control

Teknologi Pengendali () adalah sebuah alat elektronik yang digunakan untuk mengoperasikan sebuah mesin dari jarak jauh. Remote control terdiri dari Tx dan Rx (*transmitter* dan *receiver*) yang merupakan pengirim data dan penerima data, data yang dikirim adalah data PPM (*Pulse Position Modulation*) atau PCM (*Pulse Code Modulation*). Dengan frekuensi 27, 35, 72 dan 2,4 GHz.

Beberapa jenis *transmitter* digunakan berdasarkan dari frekuensi yang dipakai, jumlah *channel* (titik yang biasa dikontrol) minimum untuk pesawat model adalah 3 *channel*, dan fasilitas penyimpanan data digital. Contoh gambar *remote control* ditunjukkan pada gambar gambar 2.4 *Remote Control* AT-9.



Gambar 2.16 Remote Control *Radiolink AT-9*

Sumber : (dronesforsaleclassified.com)

Radio transmitter mengirimkan sinyal-sinyal sesuai dengan posisi dari tiap kanal. Bentuk sinyal yang dikirim tidak ada aturan baku yang mengatur sehingga perusahaan pembuat dapat membuat sinyal kirim sesuai dengan keinginan.

Keluaran *radio receiver* dapat langsung digunakan untuk mengendalikan servo dan ESC karena sinyal *radio receiver* merupakan sinyal standar dalam dunia RC. Pada penelitian ini keluaran *receiver* dihubungkan dengan perangkat modul mikrokontroler agar dapat digunakan untuk mengatur gerakan-gerakan *quadcopter* pada saat terbang secara manual. *Radiolink AT-9* ini memiliki 9 kanal, 4 buah digunakan untuk mengatur gerakan *roll*, *pitch*, *yaw*, dan *throttle*, dan 5 kanal sisa digunakan untuk *switch* dari mode manual ke otomatis.

(sumber : <http://www.electronicglobal.com/2011/09/remote-control.html>)